

다중-FACET 홀로그론을 이용한 레이저 주사시스템에 관한 연구

(A Study on Laser Scanning System Using Multi-Facet Hologon)

申 光 容*, 金 男**, 朴 漢 奎**

(Kwang Yong Shin, Nam Kim and Han Kyu Park)

要 約

홀로그래를 이용한 광 주사장치는 다면경(polygon)을 이용하는 것보다 광학계가 간단해지고 제작가격이 낮아지는 장점이 있다. 특히 본 연구에서는 흔들림에 강하도록 홀로그래를 underfilled 통과형(transmission) 디스크 형태로 제작하였고, 고회절 효율을 얻기 위해 은염(silver halide) 감광 물질을 사용, 체적형 위상 홀로그래를 형성시키므로써 50% 이상의 회절 효율을 얻었다. 주사 형태는 1 차원적인 선을 갖는 7 개의 facet을 사용하여 13개의 주사선을 갖는 2 차원 평면 주사를 얻어냈다. 이 시스템은 pos용 바코드 판독기에 실제적으로 응용될 수 있다.

Abstract

Laser scanning system using a hologram is simpler in optical system, lower in cost than using a polygon. In this paper, a thick hologram is fabricated for the underfilled transmission disk type with a merit of wobble insensitivity to vibration. High diffraction efficiency over 50% is obtained using silver halide recording material.

The two-dimensional scan pattern with 13 scan-line is made by 7-facet hologon and mirror system. This system can be practically applied to POS(Point of Sale) bar-code symbol reader.

I. 서 론

레이저 광 주사장치는 주사특성에 따라 여러 형태로 구분이 가능한데, 편향소자의 형태에 따라 디스크형과 실린더형, 편향방식에 따라 overfilled형과 underfilled형, 반사형과 통과형으로 나눌 수 있다.¹⁾

주사장치의 구동 방식에 따라서는 기계적 주사장치와 비기계적 주사장치로 나눌 수 있으며, 비기계적 주사장치는 A/O deflector, E/O 효과와 TIR을 이용한 주사장치, M/O 선형배열을 이용한 주사장치가 있으며, 기계적 주사장치는 갈바노미터, 다면경 주사장치, 홀로그래 주사장치(hologon)가 있다. 갈바노미터 주사장치는 shaft에 반사경을 부착하여 회전시켜 주사하는 것으로 해상도가 높은 반면에 비선형 주사방식이다. 다면경 주사장치는 해상도가 높으나 가격이 비싼 단점이 있고, 컴퓨터 라인 프린터에 가

*準會員, **正會員, 延世大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1987年 12月 30日

장 많이 사용된다.^[1] 홀로그램 주사장치는 다면경 대신 홀로그래픽 격자를 이용한 것으로 가격이 싸며 다루기가 용이하다. 또한 간단한 화학적 처리 즉 현상, 정착, 표백 등을 거쳐 대량생산이 가능하여 많은 연구가 되고 있다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 흔들림에 의한 영향을 최소화하기 위해 under-filled 통과형 디스크 홀로그램 주사장치^[11]를 제작하였다.

홀로그램을 이용한 레이저 주사장치는 1967년 Cin-drich에 의해 처음 제시되었고^[12] 1972년 Young은 zone plate에서의 수차 문제를 해석하였다.^[13] 1975년 Pole 등은 18개의 홀로그램 facet을 이용한 주사장치와 다면경 주사장치를 비교하였고,^[14] 1979년 Ikeda 등은 홀로그램의 생성시 평행광을 비스듬히 입사시킨 modified IZP(interferometric zone plate)를 제작하여 수차가 제거된 격자형 주사형태를 실현시켰으며,^[15] 1982년 Ono 등은 3개의 구면과와 1개의 평행광을 혼합하여 형성된 GZP(generalized zone plate)를 제작하여 수차가 제거된 델타 주사형태를 이루었다.^[17] 그러나 이와같이 제작된 IZP와 GZP는 Bragg각에서 홀로그램이 재생되지 못하므로 회절효율이 낮은 단점을 가지고 있어 실제적인 응용에는 문제가 있었다. 그 후 NEC사는 thermoplastic 물질에 회절율이 35%가 되는 홀로콘 주사장치를 만들어 POS 스캐너를 실현시켰다.^[16]

본 연구에서는 발산 구면과와 평행광을 기록물질에 비스듬히 입사시켜 Ikeda 등이 제시한대로 수차를 제거시켰으며, 바-코드에 입사하는 주사빔의 크기(약 100 μm)를 작게하기 위하여 재생시 평행광을 입사시켰다. 상용되는 기록물질인 은염, DCG, 포토레지스트, thermoplastic 중에서 고감도이며 다루기가 용이한 은염을 사용하였다. 감광유제의 두께가 5 μm인 Agfa 8E75 HD 은염필름을 사용하여 체적형 홀로그램을 형성시켜 50% 이상 회절효율을 얻었다. 또한 고정된 Setting에서 7개의 홀로그램을 제작하여, 각각의 홀로그램에서 원하는 공간 주파수 대역을 선택하여 긴 주사선을 갖는 facet 3개와 짧은 주사선을 갖는 facet 4개를 이용한 홀로콘 제작과 거울배치를 통해 13개의 주사선을 갖는 평면주사를 실현시켰으며 이는 임의의 방향으로 놓여진 POS용 바코드를 판독하는데 응용될 수 있다. 긴 주사선을 거울로서 분할함으로써 분할된 주사선내에서는 선형성을 나타냈다.

II. 은염의 체적형 회절격자 형성

은염의 감광유제는 은 할로겐족, 즉 브롬화은의 매

우 작은 입자로 덮혀 싸여 있으며 해상도가 높고 변조율이 커야하므로 입자의 크기가 작고 감광유제내에서 빛의 산란이 적을수록 적합하다. 은염은 입력된 빛에서 광자를 흡수하여 식(1)과 같이 자유전자를 발생시키며



발생된 자유전자는 결정내에서 움직이다가 식(2)와 같이 은과 반응한다.

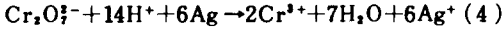


은원자 하나의 수명시간은 1 초 정도이고, 현상을 촉진하기 위해서는 최소한 3~4개의 은원자의 잠재영상 알갱이가 필요하다. 은원자의 잠재영상 알갱이는 현상에 의해 완전히 금속은(metallic silver)이 되고 알갱이가 없는 부분은 은이온으로 남게 된다. 즉 현상액은 젤라틴에 흡수되어 은염 결정과 접촉하여 촉매 작용에 의해 금속은을 형성하며, 금속은으로 되지 못한 부분은 정착과 세척과정에서 씻겨져 나가게 되고 이러한 일련의 과정에서 감광유제의 밀도변화, 즉 흡수계수에 변화가 일어난다. 이와같이 얻어진 것이 진폭형 격자이고 표백과정을 통해 위상형 격자로 되는데, 이는 진폭형 격자에서 빛을 흡수하는 은이 내부 굴절율의 변화로 바뀌면서 위상형 격자로 된다. 평면형 진폭형 격자는 입력 빔 세기에 대한 1차 회절빔의 세기가 6.25% 정도이고, 체적형 진폭형 격자는 3.7% 정도이며, 평면형 위상형 격자의 최대 회절율은 이론적으로 33.9%이고 체적형 위상형 격자는 100%이다.^[18] 표백과정 중에서 감광유제내에 분포되어 있는 금속은이 제거되면서 금속은을 산화시키는 표백액이 감광유제에 흡수되어,



의 반응을 일으킨다.

할로겐족 화합물로 이루어진 표백액으로는 AgCl, AgBr, Ag₂Fe(CN)₆, AgI, AgHgCl, 등이 일반적으로 많이 사용된다.^[19] AgBr은 AgCl에 비해 산란에 의한 잡음이 많이 생기나 회절 효율은 증가하며 Ag₂Fe(CN)₆은 AgBr에 비해 회절 효율은 좋으나 홀로그램상에 잡음이 많이 생기는 단점이 있다. 본 실험에서는 표백액 성분중에 중크롬산 칼륨(K₂Cr₂O₇)과 브롬화 칼륨(KBr)을 함유시켜 사용하였다. 이러한 성분은 silver halide sensitized gelatin(SHSG)의 과정과 유사한 젤라틴층의 국부적인 경도차를 가져와 감광유제에 체적형 위상형 격자를 생성한다.^[16, 18] 즉 중크롬산 칼륨을 함유하는 tanning 표백액에 의해 다음과 같은 반응이 일어난다.



위의 반응에서 발생한 Cr^{3+} 이온은 젤라틴 분자를 연계결합시켜 현상된 은입자 주위에 있는 젤라틴을 견고하게 한다. 따라서 노출된 부분의 젤라틴은 노출되지 않는 부분의 젤라틴보다 견고해져 이러한 경도차는 물에 부풀리는 과정을 거치면서 굴절을 분포의 차이를 발생시켜 결과적으로 감광유제내를 통과하는 빔의 위상 변화가 생긴다.^[12]

III. 위상형 홀로그래프의 제작 및 성능 고찰

1. 홀로그래프 제작

그림 1은 홀로그래프 격자를 제작하기 위한 광학적 배치로서, 출력이 20mW인 편광된 He-Ne 레이저에서 나온 빔을 핀 홀을 통해 공간 필터링하고 노출시간을 적절히 조정하기 위해 셔터를 사용한다. 필터링된 레이저 빔은 반투과 거울을 거침으로써 두 빔으로 나누고 이때 두 빔의 세기가 1:1이 되도록 하였으며 분리된 통과빔에 반사빔은 반투과 거울의 앞면과 뒷면에서 반사가 일어나 잡음으로 나타나므로 핀홀 1, 2로 공간 필터링한다. 거울 1과 2는 빔의 경로차가 가간섭 거리를 넘지 않도록 하고, 감광물질에 대해 입사하는 두 빔의 각도를 조절한다. 두 평면파가 θ_1, θ_2 로 입사하였을때 공간 주파수 f 는

$$f = 1/d = 1/\lambda_0 (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) \quad (5)$$

- d : 격자간격
- λ_0 : 레이저 파장
- θ_1, θ_2 : 두 빔의 입사각도

와 같으므로, $\theta_1 = 35^\circ, \theta_2 = -15^\circ$ 일때 $f = 1,315 \text{ line/mm}$ 이다. 거울 1을 통해 입력되는 빔은 기준빔(평행광)이 되고, 거울 2에 의해 반사되는 빔은 물체빔(발산 구면파)이 되도록 한다. 제작한 홀로그래프를 주사장치에 사용하기 위해서는 직경이 100mm 이상 되어야 하므로, 배율이 큰 (40배) 대물렌즈 1과 촛점 거리가 길고 직경이 큰 볼록렌즈를 조합하여 사용한다. 또한 감광판에서 기준빔과의 세기가 크게 차이 나지 않도록 하기 위해 발산 구면파를 발생하는 대물렌즈 2의 확대율은 대물렌즈 1과 같은 것을 선택한다. 홀로그래프에서 주사된 빔이 400mm 떨어진 주사면에서 촛점을 갖는 주사선을 형성하기 위하여 발산 구면파를 발생시켰으며 기준빔과 물체빔이 감광판에 대하여 각각 35° 와 -15° 가 되도록 감광판의 각도를 조절한다. 위상형 홀로그래프의 제작과정과 화학적 처리시간은 표 1과 같고, 이때 사용한 표백액은 표 2에 나타나 있다.

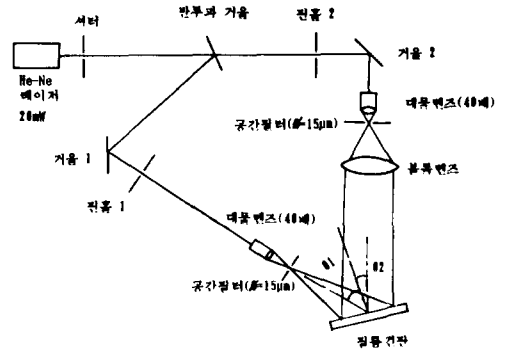


그림 1. 홀로그래프 제작을 위한 광학 시스템
Fig. 1. Optical arrangement for hologram formation.

표 1. 실험 과정 (용액온도 : 20°C)
Table 1. Processing procedure (all solutions at 20°C)

과	정	시 간
1.	노출과정	
2.	현상처리 (Agfa Developer GP 61)	4 분간
3.	세척처리 (증류수)	1 분간
4.	정착처리 (Kodak Rapid Fixer Sol. A)	4 분간
5.	세척처리 (증류수)	1 분간
6.	표백처리 (표 2 참조)	
7.	세척처리 (증류수)	10 분간
8.	에탄올 처리	2 분간
9.	Agepon 용액 처리	2 분간
10.	건조 (상대습도 50% 미만인 곳)	

표 2. 표백액 조성비
Table 2. Bleach formula.

표	백	액
증 류 수		1,000ml
중크롬산 칼륨		0.8g
브롬화 칼륨		4.0g
황 산		1.0ml

2. 제작된 홀로그래프의 성능 특성

직경이 40mm 이하인 렌즈를 사용하여 홀로그래프를 작게 기록하면 렌즈수차의 영향이 적고 노출시간이 짧아지므로 진동에 의한 잡음을 감소시킬 수 있어 홀로그래프가 고른 회절효율을 갖으며, 최대 78% 이상 회절효율을 얻을 수 있다.^[13] 그러나, 홀로그래프 주

사장치에 사용이 가능한 홀로그래프는 기록되는 격자의 면적이 커야하므로 직경이 200mm 이상인 큰 볼록렌즈를 사용해야 한다. 이러한 큰 볼록렌즈의 사용으로 렌즈수차가 증가되고 홀로그래프 격자의 중심 부분과 외각 부분의 빔 세기 차로 인한 회절효율의 차이가 발생한다. 따라서 시스템에 적용하기 위해서는 격자가 기록되는 부분이 고른 회절효율을 갖는 것이 중요하며 입사각이 35°와 -15°일때 Bragg 각에 덜 민감하여 홀로콘 전체에 균일한 효율을 갖을 수 있었다.

감광물질로 건판(plate)을 사용하면 건판은 필름에 비해 스크린에 고정이 용이하여 같은 노출시간에 대해 필름보다 진동에 덜 민감하나 건판 자체의 빔 흡수가 많고 회절효율이 낮으며, 건판 무게로 인해 모터 회전시키는데 많은 단점을 가지고 있다. 이에 비해 필름은 회절효율이 높고 무게가 가벼워 실제 시스템에 응용하기가 용이하므로 본 연구에서는 기록물질로써 Holotest 8E75 HD 필름을 사용하여 레이저 주사장치의 편향소자를 제작하였다. 현재 상용되는 감광물질인 DCG나 포토 레지스트는 80% 이상의 회절율을 기록할 수 있으나, DCG는 전체 처리 과정이 어렵고 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 또한 포토 레지스트는 큰 노출량이 요구되어 큰 면적의 회절격자를 기록하는데 단점이 있다. 이에 반하여, 은염은 35% 이상의 회절효율을 넘지 못하는 것으로 알려져 있었으나, 최근의 밝혀진 연구들에서는 기록물질에 의해 제한되는 것이 아니라 화학적 처리 과정에 의해 좌우되는 것으로 나타나 많은 연구가 진행되고 있다.^[12]

본 연구에서는 반복 실험 결과 증크롬산 칼륨표백액과 알콜 건조의 화학처리 과정을 도입함으로써 고 회절효율을 얻어 낼 수 있었다. 그 이유는 증크롬산 칼륨표백액에 의한 강한 연계 결합과 알콜에 의한 급격한 건조로 강한 굴절을 변화가 일어났기 때문이라 생각된다. 그러나, 확실한 근거를 마련하기 위해서는 향후 이 처리 과정에 대한 체계적 연구가 필요하다.

그림 2는 노출량의 변화에 따른 최대 회절효율을 나타낸 것으로서, 180 μJ/cm²의 노출량 일때 최대 회절효율은 52%이다. 사진 1은 홀로그래프 격자에 1mW 평행광이 입사될때 +1차 회절파가 쏠점을 형성하며 스크린 상에 맺히는 것을 나타내고 있는 것으로서 이때, 회절되지 않는 0차 투과빔은 0.28mW이며 +1차 회절빔의 세기가 0.52mW로 크게 나타남을 알 수 있으며 약 20%는 젤라틴 내에서 흡수되거나 젤라틴 표면에서 반사된다.

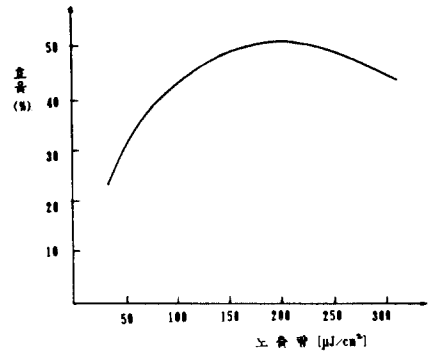


그림 2. 노출량에 따른 회절효율의 변화
Fig. 2. Diffraction efficiency vs exposure.

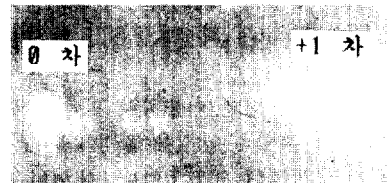


사진 1. 홀로그래프의 회절
Photo 1. Diffraction of hologram.

IV. 주사패턴 형성 및 결과 고찰

그림 1의 필름건판에 입사하는 두빔의 간섭 면적은 137mm이며, 평행광의 입사각(θ₂)는 -15°이다. 또한 발산 구면파가 입사하는 각(θ₁)은 26.1°~47.8°이며 이때 필름건판에 기록되는 격자의 공간 주파수는 1,104~1,579lines/mm이며, 중심점에서 1,315lines/mm이다. 이러한 공간 주파수의 차이로 인하여 회절각이 변화하므로 원하는 주사형태를 형성할 수 있다. POS용 바코드 판독을 위해 다방면의 주사가 필요하므로 13개의 주사선을 갖는 편향소자인 홀로콘을 제작하였으며, 본 연구에서는 큰 facet 3개와 작은 facet 4개를 이용하였다. 즉, 큰 면적의 facet은 거울을 이용하여 다시 3개의 주사선으로 나누어 9개의 주사선을 만들고, 1개 주사선을 갖는 facet 4개를 조합하여 13개 주사선과 주사형태를 만든다. 디스크 형태의 홀로콘 표면을 보호하기 위해 각각 빔 투과율이 90%인 두장의 아크릴 판 사이에 밀착시켜 제작하여 홀로콘의 실제효율은 15% 정도 낮아진다. 제작된 홀로콘은 직경이 190mm이며 사진 2와 같다. 제작된 편향소자의 각 facet은 공간 주파수가 달라 최대 회절효율을 갖는 Bragg 각의 차이가 있으므로,

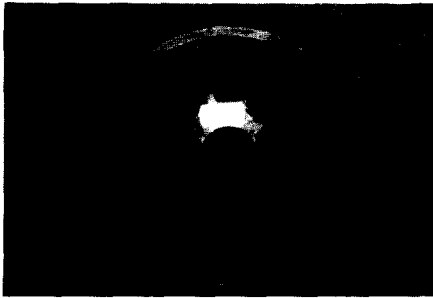


사진 2. 제작된 홀로그램
Photo 2. Fabricated hologram.

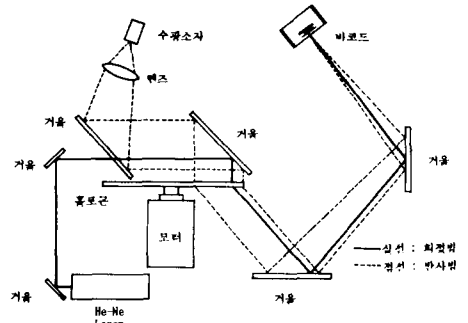


그림 4. 바코드 판독장치의 단면도
Fig. 4. Side view of bar-code reader.

본 주사장치에서는 긴 주사선을 갖는 facet의 Bragg 각을 주사장치의 입사각으로 설정하였고, 이때 짧은 주사선을 갖는 facet의 회절효율은 5% 정도 낮아졌다.

홀로그램의 회절된 빔을 이용하여 원하는 주사 형태를 얻기 위해서 그림 3 과 같은 광학계를 구성하였으며 그림 4 는 광학계의 측면도이다. 레이저에서 출력된 빔은 거울 1, 2, 3, 5을 통해 편향소자에 입사되고 편향소자에서 회절된 빔은 광학적으로 배치된 거울을 통하여 주사형태를 구성한다. 긴 주사선을 갖는 facet 1, 2, 5에서 회절된 빔은 거울 SM3, SM4, SM5

에 의해 반사되어 SM7에 입사되며, facet 3, 6에서 회절된 빔은 거울 SM1과 거울 SM6에 입사되며 facet 4, 7에서 회절된 빔은 거울 SM2와 SM8에 입사되어 주사선을 실현한다. 이와같은 편향소자와 광학계 배치를 통해 실현된 주사형태는 사진 3 과 같이 13선의 주사선을 갖는다. 이때, facet 1, 2의 주사각(scan angle)은 87° 이며 facet 5의 주사각은 76° 이다. 그리고 작은 주사선의 facet 3, 4, 6, 7의 주사각은 43° 이다. Facet 1, 2, 5의 회절각(diffraction angle)은 $45.6^\circ \sim 51.8^\circ$ 이며, 주사선 길이는 각각 316mm, 301mm, 262mm이고, 또한 facet 3, 4, 6, 7의 회절각은 $53.2^\circ \sim 55.1^\circ$ 이며, 주사선 길이는 각각 213mm, 218mm, 210mm, 222mm이다. 편향소자의 자세한 사양은 표 3 에 나타나 있다. 사진 3 에 나타난 13개 주사선은 facet 3, 4, 6, 7에 의해 7, 8, 12, 13번 주사선, facet 1, 2, 5에 의해 1~6번, 9~11번 주사선이 만들어져 중앙과 양측면에 놓여 있는 바코드를 판독할 수 있다. 또한, 분당 2,000~4,000의 높은 회전속도로 모터를 구동시켜 줌으로써 빠른 주사속도를 얻었으며 거울을 이용한 주사선의 분할은 한 주사선 내에서 직선주사를 나타내었다.

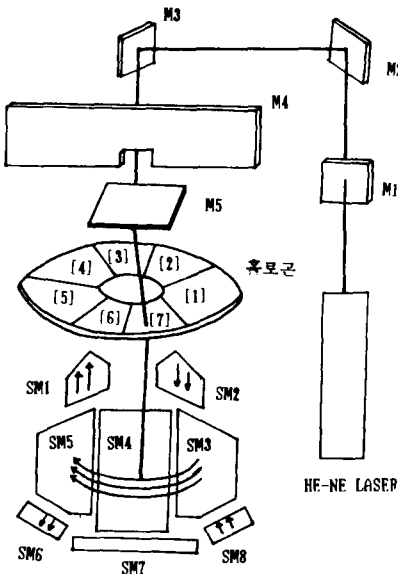


그림 3. 주사형태 실현을 위한 광학계
Fig. 3. Schematic diagram for scan pattern.

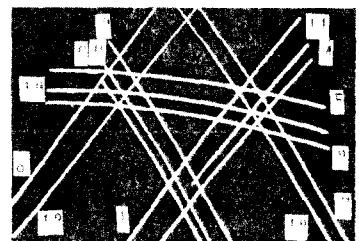


사진 3. 13선의 주사형태
Photo 3. Scan pattern composed of 13 lines.

표 3. 각 facet의 회절각, 주사각, 주사선 길이
 Table 3. Diffraction angle, scan angle, scan length of facets.

Facet 번호	주사선 번호	주사각	회절각	주사길이(㎍)
1	1	87°	45.6°	130
	2		45.9°	97
	3		45.6°	89
2	4	87°	50.0°	118
	5		49.6°	100
	6		51.8°	83
3	7	43°	55.1°	213
4	8	43°	54.9°	218
5	9	76°	48.2°	89
	10		47.7°	99
	11		50.1°	74
6	12	43°	53.2°	210
7	13	43°	53.4°	222

V. 결 론

고감도이며 다루기가 편한 은염을 이용하여 50% 이상의 고 회절효율 홀로그램을 형성하였고, 공간 주파수 대역이 1, 104~1, 579lines/mm인 다중-facet 홀로그램을 이용하여 13개의 주사선을 갖는 2 차원 주사형태를 얻었다. 실제적인 POS용 바코드 레이저 스캐너에 사용하기 위해 직경이 100mm 이상인 홀로그램을 제작하였다.

은염에 기록된 정보를 포토 레지스트에 접촉복사(contact printing)하므로써 대량 복사를 통한 경제성 향상을 꾀할 수 있다.⁽¹⁴⁾ 다중 facet 홀로콘과 다양한 거울 배치를 통해 2 차원 평면주사를 실현시켰으나 회절각도와 촛점거리를 변화시키면 3차원 주사를 실현시킬 수 있다. 이와같은 주사장치는 바코드 레이저 스캐너 뿐만 아니라 레이저 조명, 레이저 프린터 등에 응용될 수 있다.^(15,16)

參 考 文 獻

[1] T.S. Fislis, "Multifunction document processor," *Proc. of SPIE*, vol.396, pp.20-27, April 1983.
 [2] 박한규, 김 남, 전석희, 백남식, 길상근, 은재정, "초고속 레이저 프린터 시스템의 개발," 전자공학회 논문집, vol. 24, no. 5, pp. 331-337, March 1987.
 [3] I. Cindrich, "Image scanning by rotation of a hologram," *Appl. Opt.*, vol.6, pp.1531-1534, Sep. 1967.

[4] M. Young, "Zone plates and their aberrations," *J. Opt. Soc. Am.*, vol.62, pp.972-976, Aug. 1972.
 [5] R. V. Pole and H.P. Wollenmann, "Holographic laser beam deflector," *Appl. Opt.*, vol. 14, pp.972-980, April 1975.
 [6] H. Ikeda, M. Audo and T. Inagaki, "Aberration corrections for a POS hologram scanner," *Appl. Opt.*, vol.18, pp.2166-2170, July 1979.
 [7] Y. Ono and N. Nishida, "Holographic laser scanners using generalized zone plate," *Appl. Opt.*, vol.21, pp.4542-4548, Dec. 1982.
 [8] H. Miyazaki, "Built-in type POS scanner using holographic deflector," *NEC Res. & Develop.*, no.75, pp.56-62, Oct. 1984.
 [9] K. Biedermann, "Silver halide photographic materials," *Holographic Recording Materials* ed. by H. Smith, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1977.
 [10] P. Hariharan, "Bleached photographic phase holograms," *Opt. Comm.*, vol.56, pp.318-320, Jan. 1986.
 [11] W. R. Graver, J. Q. Gladden and J. W. Eastes, "Phase holograms formed by silver halide (sensitized) geletin processing," *Appl. Opt.* vol.19, pp.1529-1535, May 1980.
 [12] 김 남, 정만호, 박한규, "은염건판을 이용한 고효율 회절격자에 관한 연구" 광동 및 레이저 학술발표 논문집, vol. 3, pp. 97-100, Feb. 1988.
 [13] D.J. Cooke and A.A. Ward, "Reflection hologram processing for high efficiency in silver halide emulsions," *Appl. Opt.*, vol.23, pp.934-941, March 1984.
 [14] N. Nakano and Nishida, "Contact printing method utilizing heated photoresist adhesive property for hologram copying," *Appl. Opt.*, vol.18, pp.3073-3074, Sep. 1979.
 [15] C.J. Krammer and P.A. Pizzutelli, "Hologon laser scanner," *Photo. Spec.*, pp.89-96, Nov. 1985.
 [16] H. Iwaoka and T. Shiozawa, "Aberration-free linear holographic scanner & its application to a diode-laser printer," *Appl. Opt.*, vol.25, pp.123-129, Jan. 1986.
 [17] 길상근, "CGVH를 이용한 레이저 광 주사장치에 관한 연구" 연세대학교 석사논문, 1986.
 [18] 윤남일, "레이저 주사장치의 곡률보정에 관한 연구" 연세대학교 석사논문, 1987. *